



Application de la méthode LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière

A. Hauet, M. Jodeau, J. Le Coz, B. Marchand, A. Die Moran, R. Le Boursicaud, Guillaume Dramais

► To cite this version:

A. Hauet, M. Jodeau, J. Le Coz, B. Marchand, A. Die Moran, et al.. Application de la méthode LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2014, 3, pp.16-22. 10.1051/lhb/2014024 . hal-01118478

HAL Id: hal-01118478

<https://hal.science/hal-01118478>

Submitted on 19 Feb 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Application de la méthode LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière

Alexandre HAUET¹, Magali JODEAU², Jérôme Le COZ³, Bertrand MARCHAND⁴, Andrés die MORAN⁵, Raphaël Le BOURSICAUD³, Guillaume DRAMAIS³

¹ EDF – DTG – DMM – 21 avenue de l'Europe, 38000 Grenoble, France – alexandre.hauet@edf.fr

² EDF – R&D – LNHE – 6 quai Watier, 78401 Chatou Cedex, France – magali.jodeau@edf.fr

³ IRSTEA – UR HH – 3 bis quai Chauveau, CP220, 69336 Lyon cedex 09, France – jerome.lecoz@irstea.fr

⁴ DeltaCAD – Parc Technologique, Rue les Rives de l'Oise, 60280 Venette, France – marchand@deltacad.fr

⁵ Laboratoire d'Hydraulique St Venant – Université Paris-Est, 6 quai Watier, Chatou, France

RÉSUMÉ. – La technique LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) permet de mesurer les vitesses de surface d'un écoulement par analyse de séquence d'images. Pour faciliter l'application opérationnelle de la méthode, un logiciel, Fudaa-LSPIV, a été développé par la société DeltaCAD dans le cadre d'une collaboration entre EDF et Irstea. Deux applications en laboratoire et en rivière sont présentées : (i) couplée avec des mesures de hauteur d'eau et de bathymétries, la LSPIV a permis d'estimer des paramètres de Shields sur le modèle physique à fond mobile du Vieux-Rhin ; (ii) le logiciel a été utilisé pour procéder à des analyses de sensibilité pour paramétrer ainsi au mieux les stations LSPIV de mesure de débit en crue de rivières cévenoles.

Mots-clés : hydrométrie, modèle physique, rivière, crue

Application of the LSPIV method for the measurement of velocity fields and flood discharges in reduced scale model and in rivers

ABSTRACT. – LSPIV technique enables the measurement of surface flow velocities using image sequence analysis. EDF and Irstea partnership made possible the development of Fudaa-LSPIV freeware by DeltaCAD Company. Two software applications at flume and field scales are detailed: (i) bed shear stresses were calculated owing to LSPIV velocities, water depth and bathymetry for a physical model of the Old Rhine; (ii) the software was used to optimize the calculation parameters of LSPIV flood discharge measurement stations in Mediterranean rivers.

Key-words: hydrometry, physical model, river, flood

I. INTRODUCTION

Le scientifique et l'ingénieur étudiant les rivières sous des aspects de débit liquide ou de flux sédimentaire se heurtent souvent à une inadéquation entre les mesures hydrométriques disponibles et les besoins. Ces besoins ont évolué, en parallèle avec le développement de la modélisation numérique, vers une demande de données spatialisées, à haute fréquence temporelle, et pour des conditions d'écoulement diverses. Particulièrement, les mesures de vitesse et de débit de crue restent souvent impossible à réaliser avec les techniques traditionnelles de jaugeage (courantomètres, ADCP, dilution chimique), quand les fortes vitesses et les nombreux débris flottants mettent en danger les opérateurs et le matériel. De plus, le temps de mesure inhérent à ces techniques est souvent en inadéquation avec le caractère fortement transitoire des écoulements de crue. Le développement des outils de modélisation 2D voire 3D pour la compréhension des écoulements, en milieu naturel et en modèle physique de laboratoire, demande, pour validation, des mesures complémentaires à des hauteurs d'eau ou des débits. Les résultats spatialisés en termes de vitesses de ces modèles numériques nécessitent une mesure hydrométrique correspondante,

c'est-à-dire un champ de vitesse spatialisé. Là encore, les techniques traditionnelles de mesure de vitesse ne répondent pas complètement à ces besoins, en fournissant une mesure ponctuelle dans le temps et/ou l'espace.

L'hydrométrie par analyse de séquences d'images est une alternative intéressante qui permet la mesure de vitesses instantanées de surface sur des zones allant jusqu'à l'hectare, et ce de façon non intrusive. Cette technique est appelée Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV). Une collaboration entre EDF et Irstea a permis le développement d'un logiciel de calcul LSPIV, libre et gratuit : Fudaa-LSPIV. Cet article présente les principes de la technique LSPIV ainsi que le logiciel Fudaa-LSPIV. Deux cas expérimentaux utilisant le logiciel Fudaa-LSPIV sont présentés concernant (i) une application pour l'étude de la restauration du transport des graviers sur le Vieux Rhin en modèle réduit, et (ii) une application pour la mesure de débit de crue en Ardèche.

II. PRÉSENTATION DE LA TECHNIQUE LSPIV

L'analyse de séquences d'images permet de mesurer le champ 2D de vitesse en surface d'un écoulement à condition

que des traceurs visibles, tels que des particules solides (débris végétaux, petits flottants, etc.), des bulles ou des figures de turbulence (toujours présentes en crue) soient advectés avec l'écoulement. Cette technique est dérivée de la Particle Image Velocimetry (PIV, [Adrian, 1991]) utilisée en laboratoire, mais pour une étude sur des objets de grande taille de type rivière, d'où le nom de Large-Scale PIV (LSPIV, [Fujita *et al.*, 1998]). Une mesure LSPIV comprend (i) l'enregistrement d'une séquence d'images horodatées de l'écoulement, (ii) une correction géométrique des images pour s'affranchir des effets de distorsion de perspective (orthorectification) et (iii) un calcul du déplacement des traceurs de l'écoulement grâce à une analyse statistique en corrélation des motifs (i.e. formes visibles à la surface de l'écoulement). En pratique, l'ensemencement de l'écoulement par ajout de traceurs n'est souvent pas nécessaire pour les rivières en crue : si le mouvement de l'eau est visible dans une séquence d'images, en général il sera possible d'en extraire les vitesses. On obtient ainsi un champ 2D « quasi instantané » (à la fréquence d'échantillonnage des paires d'images, limitée par la fréquence d'acquisition de la caméra et l'amplitude des déplacements de motifs). Connaissant la bathymétrie d'une section en travers et supposant un modèle de distribution verticale de vitesse, on peut estimer le débit à partir du champ de vitesse LSPIV. La LSPIV a été utilisée pour estimer des débits de rivières de tailles très différentes, pour des conditions hydrologiques variées, des étiages aux fortes crues, (voir par exemple [Bradley *et al.*, 2002], [Creutin *et al.*, 2003], [Hauet *et al.*, 2008] ou [Jodeau *et al.*, 2008]) et pour améliorer des courbes de tarage en régimes hydrauliques normaux ([Le Coz *et al.*, 2010a] ou [Dramais *et al.*, 2011]). Une revue des applications de la LSPIV pour l'estimation des débits en rivières a été proposée par [Muste *et al.*, 2008]. La LSPIV a également été utilisée pour l'étude de la dynamique d'écoulements complexes, comme [Le Coz *et al.*, 2010b] ou [Hauet *et al.*, 2009]. La LSPIV s'est également montrée être un outil performant pour l'étude des écoulements de ruissellement sur versant ([Nord *et al.*, 2009], [Legout *et al.*, 2012]) où les instruments intrusifs ne peuvent être utilisés du fait des très faibles hauteurs d'eau considérées (millimétriques).

III. TRAITEMENT DES IMAGES POUR LE CALCUL DES VITESSES ET DU DÉBIT

La technique de calcul des vitesses par LS-PIV est constituée de plusieurs étapes.

III.1. Orthorectification

La chaîne de calcul demande en entrée une séquence d'images horodatées d'un écoulement, préalablement converties au format PGM en 256 niveaux de gris. Ces images peuvent être extraites d'un film vidéo classique. La première étape de calcul consiste à orthorectifier les images, c'est-à-dire à obtenir des images dont la géométrie a été redressée de sorte que chaque point soit superposable à une carte plane qui lui correspond. En d'autres termes, une image orthorectifiée semble être prise à la verticale de tous les points qu'elle figure, ces points étant situés sur un terrain parfaitement plat. Ce traitement nécessite la connaissance de points de référence identifiables sur les images et dont les coordonnées dans le repère de l'image et dans le repère réel sont connues, les GRP pour Ground Reference Points. Une matrice d'orthorectification permettant la correction de chaque pixel des images est calculée. Un système d'équation à 11 inconnues est obtenu, il peut être résolu en ayant au moins 6 GRP. Le détail des calculs est donné par exemple dans [Jodeau *et al.*, 2008]. La Figure 1 montre un exemple d'image orthorectifiée.

III.2. Analyse de déplacement des motifs

Une analyse statistique en corrélation croisée est effectuée sur les images orthorectifiées afin de déterminer le déplacement des traceurs visibles en surface. Un algorithme optimisé est utilisé pour les applications de grande échelle spatiale avec des résolutions d'images pouvant être faible, algorithme développé par [Fincham et Spedding, 1997]. On calcule la corrélation entre une fenêtre d'interrogation (IA, pour Interrogation Area) centrée sur un point

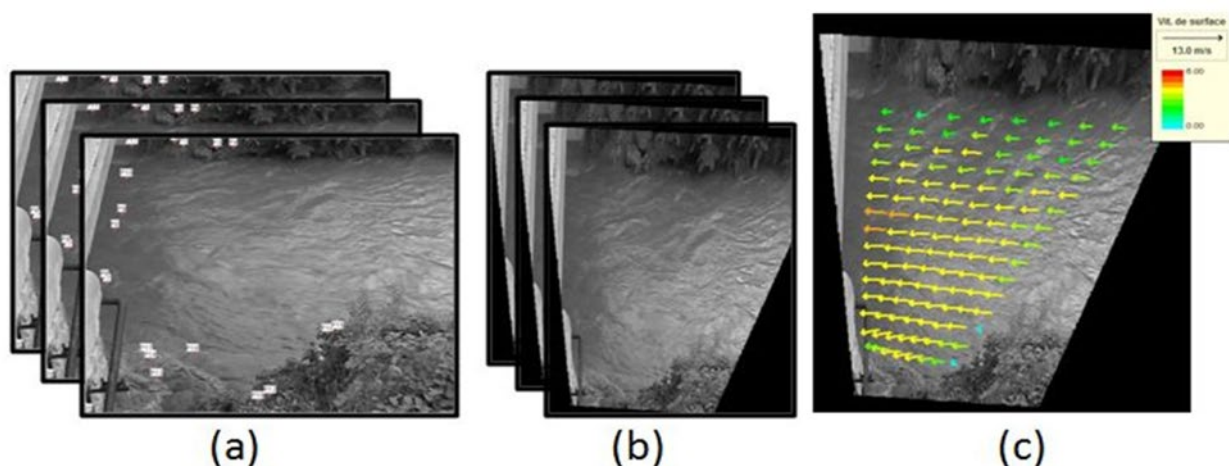


Figure 1 : Traitement LSPIV : (a) enregistrement d'images horodatées; (b) orthorectification des images et (c) analyse statistique du déplacement de traceurs de l'écoulement. Exemple de la station de l'Arc-en-Maurienne au pont de Randens (SPC 38) pendant la chasse de barrages de juin 2011.

a_{ij} dans une image et la même IA centrée sur un point b_{ij} dans l'image suivante, images séparées par un intervalle de temps de t secondes. Le coefficient de corrélation $R(a_{ij}; b_{ij})$ est calculé ainsi :

$$R(a_{i,j}; b_{i,j}) = \frac{\sum_{\substack{1 \leq i \leq M_i \\ 1 \leq j \leq M_j}} (A_{ij} - \bar{A}_{ij})(B_{ij} - \bar{B}_{ij})}{\left[\sum_{\substack{1 \leq i \leq M_i \\ 1 \leq j \leq M_j}} (A_{ij} - \bar{A}_{ij})^2 \sum_{\substack{1 \leq i \leq M_i \\ 1 \leq j \leq M_j}} (B_{ij} - \bar{B}_{ij})^2 \right]^{1/2}} \quad (1)$$

Où M_i et M_j sont les tailles de la fenêtre d'interrogation (en pixel) et A_{ij} et B_{ij} sont les distributions des intensités des pixels en niveau de gris (ie. compris entre 0 et 256) dans les deux fenêtres d'interrogation. Ce calcul n'est effectué que pour des points b_{ij} inclus dans une fenêtre de recherche définie par l'utilisateur. On suppose que le déplacement le plus probable de l'écoulement à partir du point a_{ij} pendant le temps t est celui correspondant au maximum de corrélation. Un ajustement parabolique est utilisé pour obtenir une précision de déplacement de l'ordre de 0,2 pixel [Forliti *et al.*, 2002]. Les vitesses de surface sont calculées à partir de ces déplacements en les divisant par t . Le calcul est reproduit de manière itérative sur toute l'image.

On calcule ainsi un champ « instantané » de vitesse 2D de surface, (entre deux images successives) ou un champ moyen (en moyennant sur une séquence d'images), comme illustré sur la Figure 1. Il est possible d'appliquer des filtres sur l'amplitude et l'orientation des vitesses pour éliminer les valeurs aberrantes issues du calcul statistique. L'utilisateur peut également définir ses propres filtres.

III.3. Calcul du débit

Connaissant le profil bathymétrique d'une section en travers incluse dans la zone d'analyse, on peut calculer le débit transitant par cette section. Le transect bathymétrique est interpolé à un pas défini par l'utilisateur, et une vitesse de surface est calculée pour chaque pas à partir des vitesses LSPIV les plus proches (pondération en fonction de l'éloignement). L'utilisateur définit également un coefficient reliant la vitesse de surface à la vitesse moyennée sur la profondeur pour chaque pas de calcul. Le débit est alors calculé par la méthode de la section médiane [Rantz, 1982] l'interpolation des vitesses vers les bords se faisant selon l'hypothèse du nombre de Froude constant [Fulford *et al.*, 1994].

III.4. Présentation du logiciel Fudaa-LSPIV

Pour rendre la technique LSPIV utilisable par le plus grand nombre, chercheurs ou opérationnels, EDF et Irstea ont financé et piloté le développement d'un logiciel intitulé

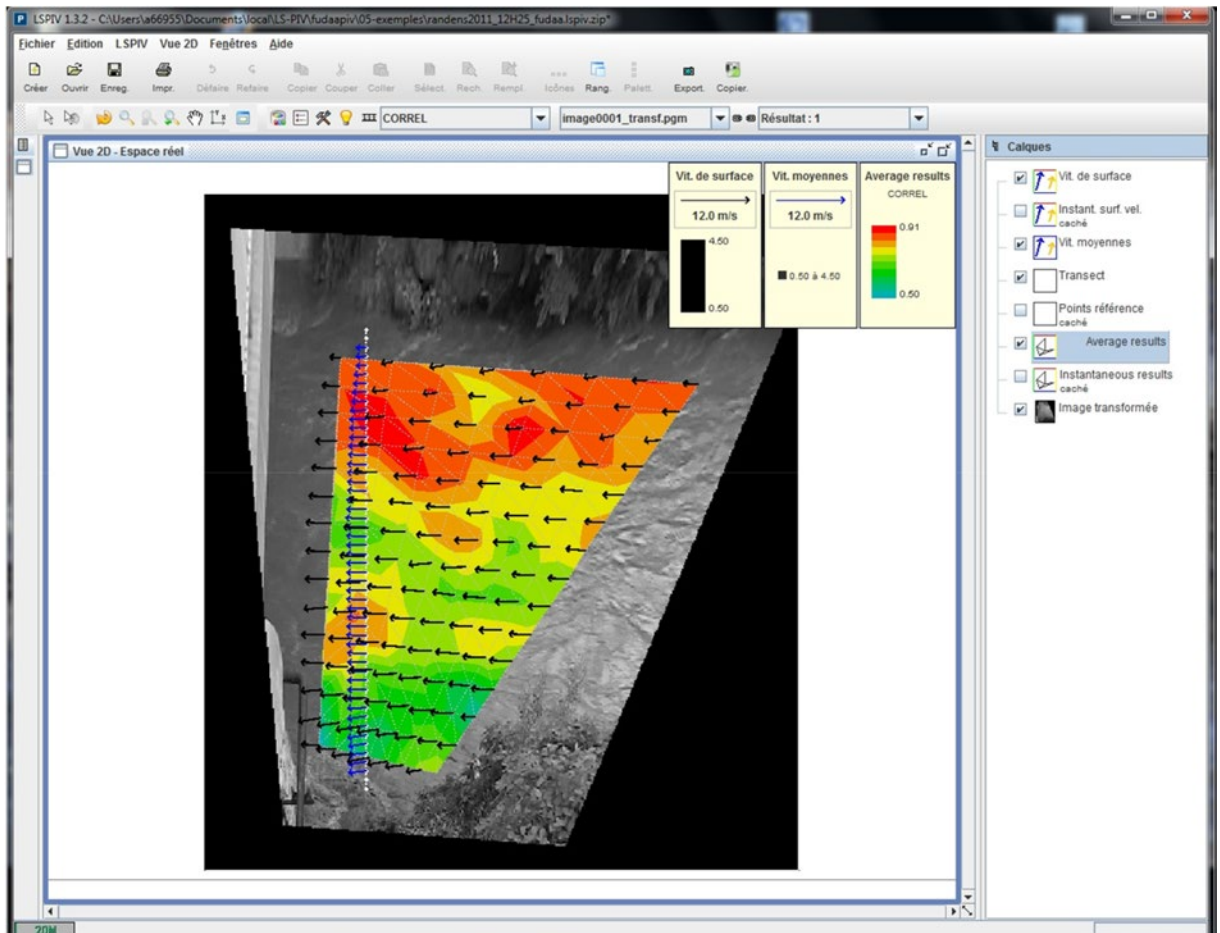


Figure 2 : Logiciel Fudaa-LSPIV, visualisation des résultats de calcul (champ de vitesse vectoriel moyen, isosurfaces de la norme des vitesses et transect de vitesses pour le calcul du débit).

Fudaa-LSPIV. Le logiciel Fudaa-LSPIV est une interface graphique Java qui appelle des exécutables Fortran qui permettent l'orthorectification des images, le calcul des vitesses par LSPIV, les calculs de moyenne et de filtres sur les vitesses et le calcul de débit sur une section de rivière. Le développement de Fudaa-LSPIV a été effectué par la société DeltaCAD. Des efforts ont été apportés pour améliorer la facilité d'utilisation et diminuer les temps de calcul. Par exemple, pour l'étape d'orthorectification, le logiciel Fudaa-LSPIV fournit une assistance pour déterminer graphiquement les coordonnées images des GRP, saisir leurs coordonnées réelles, puis calculer une matrice d'orthorectification permettant la correction de chaque pixel des images. Le logiciel est gratuit et libre, et il existe une version anglaise. Le logiciel fonctionne en environnements Windows et Linux.

IV. APPLICATION POUR L'ÉTUDE DE LA RESTAURATION DU TRANSPORT DES GRAVIERS SUR LE VIEUX RHIN EN MODÈLE RÉDUIT

Dans le cadre du projet de restauration du transport des graviers sur le Vieux Rhin, un modèle réduit à fond mobile a été construit au LNHE [El Kadi Abderrezzak *et al.*, 2012]. Ce modèle a pour objectif de déterminer les configurations les plus adaptées à une érosion de berge. Les sédiments érodés des berges, et ainsi restitués à la rivière, devraient

permettre de diversifier les formes du lit de la rivière, et favoriser ainsi la diversité écologique dans le cours d'eau. Un modèle réduit de laboratoire au 1/40^e à fond mobile a permis de modéliser la zone. Plusieurs zones ont été étudiées, les résultats sont illustrés sur un seul site, dit 03, Figure 3 (a), une modification des épis est envisagée.

Le logiciel Fudaa-LSPIV a été utilisé pour mesurer sur le modèle physique les champs de vitesse de l'écoulement pour différentes configurations d'épis. Ces champs de vitesse ainsi que la mesure de l'évolution des fonds sédimentaires permettent d'identifier le meilleur scénario d'érosion de berge en fonction de la position, l'orientation et la forme des épis. La Figure 3 (c) donne le champ de vitesse de surface pour un débit de 0,099 m³/s en laboratoire, soit 1000m³/s réel en nature, les vitesses faibles à l'aval immédiat de l'épi ainsi que les fortes vitesses à proximité de la berge sont facilement identifiables. Ces vitesses permettent d'expliquer l'évolution des fonds sédimentaires autour de l'épi, Figure 3 (b). Une érosion est en effet observée sur le côté gauche de l'épi où les vitesses mesurées sont significatives. Ces champs de vitesses, combinés à une mesure bathymétrique et une granulométrie des fonds, permettent de calculer la contrainte qui s'exerce sur le fond. La contrainte à la fin de chaque essai est calculée en utilisant la formule de Darcy, avec (i) une vitesse moyenne estimée à partir de la vitesse de surface, $V = 0,9 u$ [Graf et Altinakar, 1993] et (ii) une hauteur d'eau mesurée. La contrainte de cisaillement calculée à partir de ces valeurs, représentée sur la

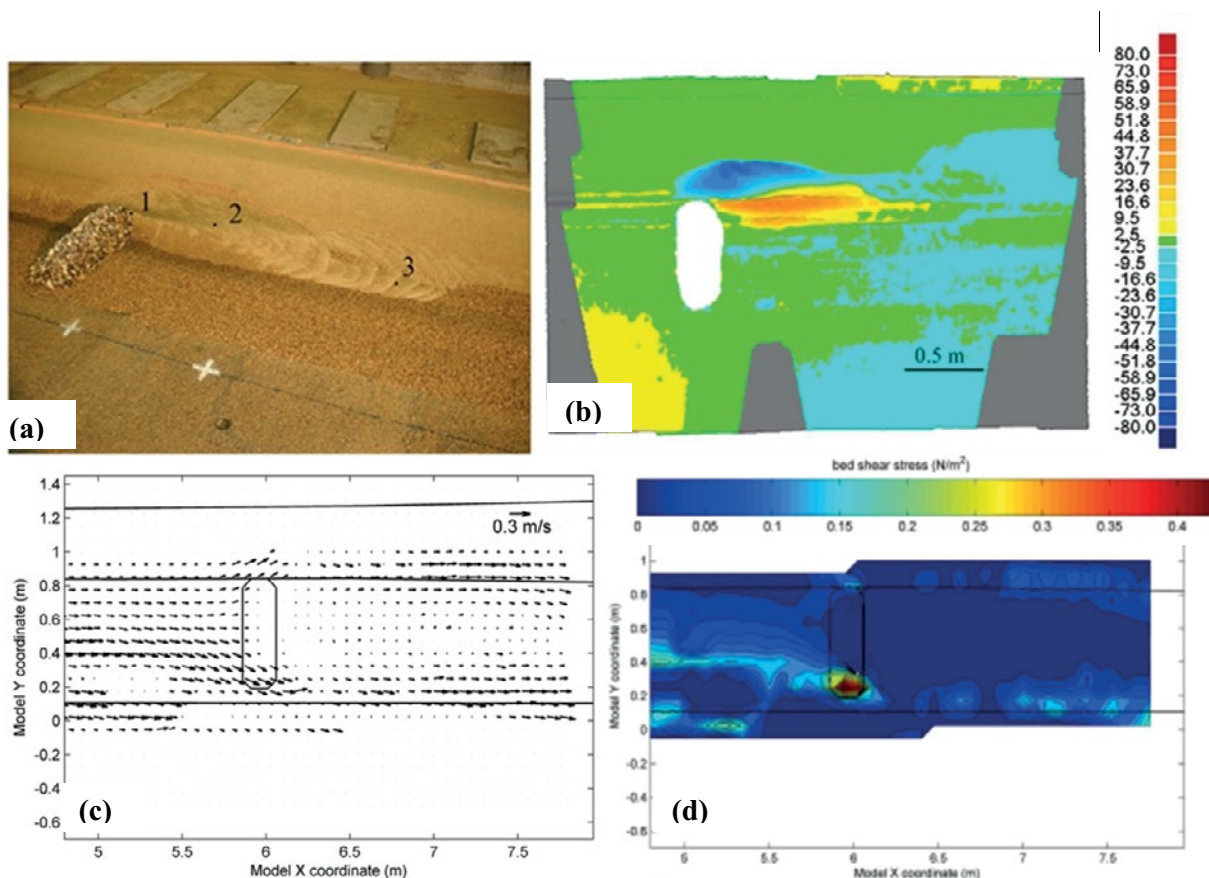


Figure 3 : Modèle physique du vieux Rhin (Hall d'essai du LNHE, EDF R&D) et utilisation de la LSPIV pour la compréhension des évolutions des fonds sédimentaires. (a) photographie du modèle après érosion (l'écoulement se fait de la gauche vers la droite) ; (b) évolution des fonds pour un débit de 0,099 m³/s au laboratoire, soit 1000m³/s réel en nature, l'échelle des variations bathymétriques est donnée en cm ; (c) vitesses de surface calculées avec Fudaa-LSPIV pour un débit de 0,099 m³/s ; (d) contrainte de cisaillement au fond calculée à partir des mesures de vitesse de la figure (c).

Figure 3 (d), explique l'équilibre atteint pour ce débit de $0,099 \text{ m}^3/\text{s}$. En effet, la fraction la plus fine a un diamètre médian de $d_m = 0,15 \text{ mm}$, ce qui donne, suivant la courbe de Shields, une valeur critique pour le début de mouvement de $0,17 \text{ Pa}$, valeur qui n'est plus dépassée à l'aval de l'épi sur la Figure 3 (d).

Cette approche comporte des limites, notamment sur l'hypothèse du calcul de contrainte à partir d'une vitesse moyenne alors que les écoulements dans la zone de l'épi sont complexes. Elle fournit cependant une carte des contraintes de cisaillement cohérente avec les évolutions du fond observées.

V. APPLICATION POUR LA MESURE DE DÉBIT DE CRUE EN ARDÈCHE

V.1. Description du dispositif

La connaissance des débits et des niveaux d'eau atteints par les rivières en crue est fondamentale pour la compréhension des processus de formation des crues éclairées. Malheureusement il est souvent impossible de mesurer les débits en rivière lors de ces crues au moyen des méthodes classiques, dont le temps de déploiement et le caractère intrusif sont généralement incompatibles avec la rapidité et la violence des phénomènes cévenols. Afin d'observer ces phénomènes, Irstea a installé en différents points du bassin de l'Ardèche des stations de mesure par LSPIV. A l'heure actuelle trois stations sont opérationnelles, et deux nouvelles stations sont en cours d'installation.

Chacune de ces stations est composée d'une caméra analogique (a), reliée à un ordinateur muni d'une connexion ADSL (b) permettant de réaliser à distance le paramétrage de la station (en particulier la fréquence des rafales et le nombre d'images par rafale) et le rapatriement des données au fur et à mesure de leur acquisition. Ce système de prise de vue permet une très grande exactitude des intervalles de temps entre images (incertitude sur Δt de l'ordre de 10^{-4} secondes). Enfin un système de mesure du niveau de l'eau (sonde de pression ou idéalement non intrusif comme un radar limnimétrique) couplé à l'ordinateur permet de connaître le niveau d'eau lors de chaque acquisition d'image.

Ces stations, en place toute l'année, offrent la possibilité de surveiller simultanément plusieurs sites et permettent de réaliser des jaugeages en crue et d'améliorer les courbes de tarage des stations pour les plus forts débits. Dans la

configuration actuelle une rafale de 20 images séparées de 0,20 seconde est acquise toutes les 20 minutes. En période de crue le laps de temps entre deux rafales peut être réduit à distance.

Pour chacune de ces stations plusieurs transects bathymétriques ont été relevés dans le champ de l'image afin d'évaluer la répétabilité et la robustesse de la méthode de jaugeage. L'interface Fudaa-LSPIV, qui n'est pas implémentée sur les stations, a été en revanche utilisée pour réaliser des tests sur les rafales d'images afin d'optimiser le paramétrage des stations. En effet, les solveurs et les formats de fichiers des stations sont les mêmes que ceux utilisés par l'interface Fudaa-LSPIV.

V.2. Paramétrage des stations

Des tests de sensibilités qui ont été réalisés sur certains paramètres. Le paramétrage des stations a été choisi de façon à tenir compte des caractéristiques de l'écoulement en chaque station et des contraintes logistiques. La principale contrainte logistique est la capacité de rapatriement des photos, dont la taille a été optimisée (résolution, niveaux de gris). Un calcul robuste du débit nécessitant un nombre minimal d'images, des tests de convergence ont été réalisés à l'aide de Fudaa-LSPIV pour estimer ce nombre. Le logiciel offre en effet la possibilité à l'utilisateur de choisir lui-même, une fois les vitesses instantanées calculées pour chaque paire d'images, le nombre de résultats sur lesquels seront calculés les vecteurs de vitesse moyenne de surface. Notons que cet outil permet également de pouvoir écarter les paires d'images que l'utilisateur pourrait juger aberrantes. Ces tests montrent qu'à partir de 10 photos (c'est à dire 9 paires d'images), la valeur ajoutée de chaque nouvelle image sur l'incertitude du champ de vitesse moyen est assez faible, voir Figure 5.

Les paramètres tels que la taille de l'aire d'interrogation, la densité de la grille de calcul ou la résolution de l'image ont également fait l'objet de tests de sensibilité à l'aide de l'interface Fudaa-LSPIV et ont abouti à des jeux de paramètres jugés optimaux pour chaque site. Le re-paramétrage des stations est directement fait en se connectant aux stations à distance.

V.3. Mesures automatiques

A l'heure actuelle, trois stations sont opérationnelles, dont la station de Vals-les-Bains sur la Volane. Installée



Figure 4 : Equipement de la station fixe de mesure LSPIV sur l'Ardèche à Sauze. (a) caméra analogique (b) caisson étanche contenant l'ordinateur et le modem.

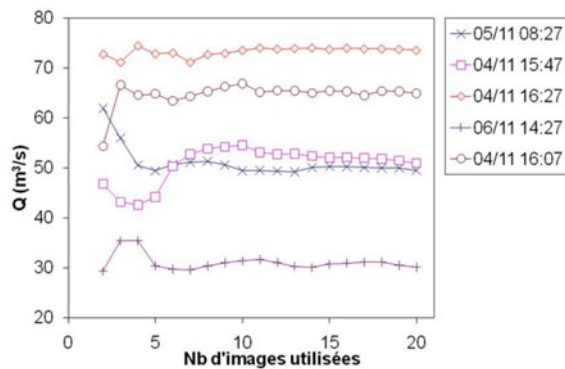


Figure 5 : Étude de convergence de la valeur de débit en fonction du nombre de photos utilisées pour cinq jeux de rafales obtenus à la station de la Volane à Vals-les-Bains lors de la crue de novembre 2011.

en 2010, cette station a permis d'enregistrer des images de la crue de novembre 2011 et d'obtenir des données de débits dans des gammes jamais jaugées jusqu'alors. La Figure 6 montre la courbe de tarage de la station, tracée à partir de jaugeages traditionnels réalisés par le SPC et la CNR depuis 1999. La LSPIV a permis de mesurer, en une crue, des débits atteignant $74 \text{ m}^3/\text{s}$, largement supérieurs au maximum jaugé par méthode traditionnelle ($43 \text{ m}^3/\text{s}$). La LSPIV vient conforter la courbe de tarage dans son tracé à haut débit. Bien que l'incertitude de chaque mesure LSPIV soit supérieure à celle d'un jaugeage traditionnel (avec une incertitude élargie typique de 10 à 20 % sur les vitesses, 10 à 15 % sur le coefficient de vitesse [Le Coz *et al.*, 2010]), la possibilité de répéter un grand nombre de mesures pendant un épisode (plus de 30 mesures pour cette crue) amène à une estimation de la relation hauteur-débit correcte en moyenne.

Cette méthode de mesure de débit n'a pas vocation à remplacer les techniques de jaugeages traditionnelles. Dans la

mesure du possible ces données doivent être complétées par des jaugeages intrusifs plus précis. Néanmoins nous voyons ici que ce dispositif permet d'acquérir (pour un coût et un dérangement négligeables, une fois la station installée et paramétrée) une grande quantité de données qui, croisées avec l'analyse hydraulique du site, permettront de préciser la courbe de tarage dans les hauts débits.

VI. CONCLUSION

La LSPIV permet de mesurer des vitesses sur des surfaces d'écoulement jusqu'à l'hectare. Cette technique est aujourd'hui utilisée en laboratoire, sur des modèles réduits, ou en site naturel. Elle s'applique aux écoulements à l'étiage, et permet de mesurer des débits lors de crues qui pourraient difficilement être jaugées avec des techniques traditionnelles. Un logiciel, Fudaa-LSPIV a été développé par la société DeltaCAD dans le cadre d'une collaboration entre EDF et Irstea. Deux applications sont présentées, (i) couplée avec des mesures de hauteur d'eau et de bathymétries, la LSPIV a permis d'estimer des contraintes de cisaillement au fond sur le modèle physique à fond mobile du Vieux-Rhin ; (ii) le logiciel a été utilisé pour procéder à des analyses de sensibilité sur les paramètres de calculs et paramétrer ainsi au mieux les stations LSPIV de mesure de débit en crue en Ardèche.

VII. REMERCIEMENTS

Le projet FloodScale est soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) contrat n° ANR 2011 BS56 027 qui contribue au programme HyMeX. Les auteurs souhaitent remercier les différentes personnes impliquées dans l'installation des stations LSPIV, et les participants aux différentes mesures LSPIV, notamment sur le modèle physique du Vieux-Rhin, Franck Lebert et Kamal El Kadi Abderrezzak.

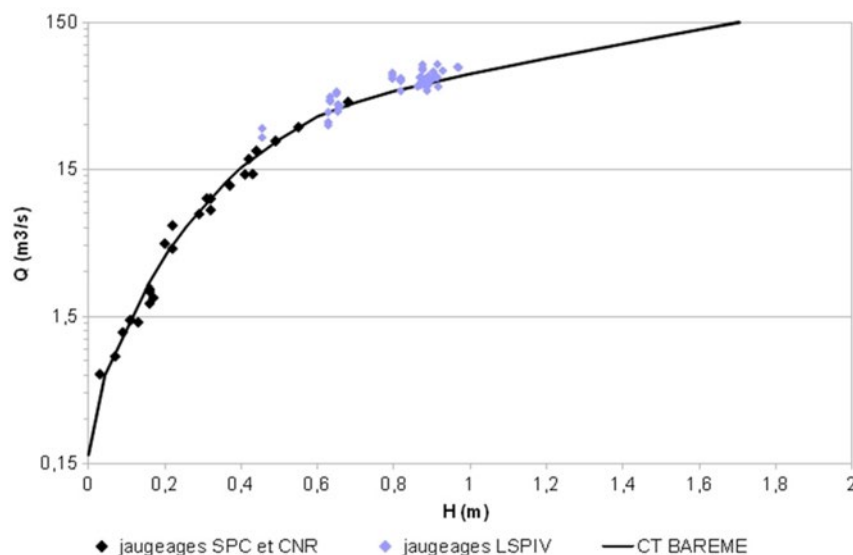


Figure 6 : Courbe de tarage de la Volane à Vals-les-bains avec les jaugeages associés par méthode conventionnelle (SPC/CNR) et par station LSPIV (Irstea).

VIII. RÉFÉRENCES

- ADRIAN RJ (1991) — Particle-imaging techniques for experimental Fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*. **23** : 261-304
- BRADLEY A. A., KRUGER A., MESELHE E. A. AND MUSTE M. V. I. (2002) — Flow Measurement in Streams Using Video Imagery. *Water Ressources Research*. **8 12** : 1315-1323
- CREUTIN J., MUSTE M., BRADLEY A., KIM S. & KRUGER A. (2003) — River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River. *Journal of Hydrology*. **277** : 182-194
- DRAMAIS G., LE COZ J., CAMENEN B. & HAUET A. (2011) — Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves. *Journal of Hydro-Environment Research*. **5-4** : 301-312
- EL KADI ABDERREZZAK K., DIE MORAN A., JODEAU M. & LEBERT F. (2012) — Optical techniques for surface velocity and bed elevation measurements in a fluvial physical scale model. *Proceedings of River Flow Conference*. 1265-1272
- FINCHAM A. M. & SPEDDING G. (1997) — Low cost, high resolution DPIV for measurement of turbulent fluid flow. *Experiments in Fluids*. **23** : 449-462
- FORLITI D. J., STRYKOWSKI P. J. & DEBATIN K. (2002) — Bias and precision errors of digital particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*. **28** : 436-447
- FUJITA I., MUSTE M. & KRUGER (1998) — A. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*. **36** : 397-414
- FULFORD J., THIBODEAUX K. & KAEHRLE (1994) — Comparison of current meters used for stream gaging. *proceeding ASCE Symposium on Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation* 376-385
- GRAF W. & ALTINAKAR M. (1993) — Ecoulement non permanent et phénomènes de transport. *Hydraulique fluviale Tome 2. Presses polytechniques et universitaire romandes*
- HAUET A., KRUGER A., KRAJEWSKI W., BRADLEY A., MUSTE M., CREUTIN J. & WILSON M. (2008) — Experimental system for real-time discharge estimation using an image-based method. *Journal of Hydrologic Engineering*. **13** : 105-110
- HAUET A., MUSTE M. & HO H.-C. (2009) — Digital mapping of riverine waterway hydrodynamic and geomorphic features. *Earth Surface Processes and Landforms*. **34** : 242-252
- JODEAU M., HAUET A., PAQUIER A., LE COZ J. & DRAMAIS G. (2008) — Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*. **19** : 117-127
- LE COZ J., HAUET A., PIERREFEU G., DRAMAIS G. & CAMENEN B. (2010) — Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *Journal of Hydrology*. **394** : 45-52
- LE COZ J., MICHALKOVA M., HAUET A., COMAJ M., DRAMAIS G., HOLUBOVA K., PIEGAY H. & PAQUIER A. (2010) — Morphodynamics of the exit of a cutoff meander: experimental findings from field and laboratory studies. *Earth Surface Processes and Landforms*. **35-3** : 249-261
- LEGOUT C., DARBOUX F., NEDELEC Y., HAUET A., ESTEVES M., RENAUX B., DENIS H. & CORDIER S. (2012) — High spatial resolution mapping of surface velocities and depths for shallow overland flow. *Earth Surface Processes and Landforms*. **37** : 984-993
- MUSTE M., FUJITA I. & HAUET A. (2008) — Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Ressources Research*. **44** : 1-14
- NORD G., ESTEVES M., LEPETITE J. & HAUET A. (2009) — Effect of particle density and inflow concentration of suspended sediment on bed-load transport in rill flow. *Earth Surface Processes and Landforms*. **34** : 253-263
- RANTZ S. E. & OTHERS (1982) — *Measurement and Computation of Streamflow : Volume 1. Measurement of Stage and Discharge*. USGS. 2175